Fiabilité de la mesure de vitesse débitante à l'aval d'une singularité en réseau d'assainissement

■ A. EL BAHLOULI[1], E. MIGNOT[2], F. DENIS[2], N. RIVIÈRE[2], A. DALMON[2], G. LIPEME KOUYI[3], C. JOANNIS[1], F. LARRARTE[1]

Mots-clés : réseau d'assainissement, singularités, mesure de débit, capteurs
Keywords: sewer network, singularities, flow rate measurement, sensors

Introduction

Le contexte réglementaire (arrêté du 21 juillet 2015) et normatif [AFNOR, 2001 ; AFNOR, 2008] incite les gestionnaires à surveiller les réseaux d'assainissement, évaluer leurs performances, intervenir rapidement en cas de dysfonctionnement ponctuel, informer le maître d'ouvrage sur les aménagements souhaitables pour améliorer les performances et augmenter la fiabilité de la collecte. Dans ce contexte, la connaissance du débit d'eau transitant dans les conduites est un préalable indispensable.

Pour des raisons de simplicité d'installation et de fiabilité de la mesure, les installations ne mettant en œuvre que des mesures de hauteurs d'eau afin d'estimer les débits sont à privilégier. Cependant, elles impliquent l'existence d'une relation permanente localement entre la hauteur d'eau et le débit. Dès que cette dernière n'est pas assurée, il devient nécessaire d'associer une mesure de vitesse longitudinale moyenne (aussi appelée vitesse débitante, notée $\overline{U}$) à la mesure de hauteur d'eau pour évaluer le débit liquide Q tel que $Q = \overline{U}\,S$ avec S la section de l'écoulement. Les deux technologies les plus fréquemment mises en œuvre sont la mesure par temps de transit, ou corde, et la méthode ultrasonore par effet Doppler. Toutes deux réalisent leurs mesures dans un domaine spatial qui n'est pas confondu avec la section de l'écoulement, et les résultats bruts doivent être extrapolés pour obtenir la vitesse débitante. Un coefficient d'extrapolation peut être intégré dans les appareils de mesure, mais il ne peut correspondre qu'à des conditions d'écoulement prédéfinies. C'est pourquoi des conditions de mise en œuvre sont spécifiées d'une manière assez stricte, et préconisent en particulier des distances minimales à l'aval de singularités ou ouvrages spéciaux, tels que des coudes ou des confluences. Ces conditions sont souvent assez difficiles à respecter en réseau d'assainissement, et même si elles sont respectées, les incertitudes obtenues ne sont pas spécifiées.

L'objectif de cet article est de quantifier les erreurs faites lorsqu'une mesure de vitesse est effectuée à l'aval d'une singularité pour des situations réalistes de collecteurs d'assainissement urbain. L'erreur est définie comme l'écart entre un mesurande (ici la vitesse moyenne) et un résultat de mesure. L'erreur est impossible à connaître, car si on la connaissait, on la corrigerait bien sûr. Dans le cadre du projet Mentor [LARRARTE *et al.*, 2015] nous avons choisi d'évaluer cette erreur sur des cas types en fixant une valeur de mesurande (la vitesse moyenne ou le débit) et un contexte hydraulique (la hauteur d'eau) pour simuler la réponse de capteurs au champ complet de vitesses (trois composantes en tout point de l'écoulement) calculé par un modèle hydrodynamique 3D. Dans un premier temps, on simule donc le champ de vitesse à l'aval d'une singularité en suivant les bonnes pratiques de modélisation numérique permettant de garantir la robustesse des résultats obtenus. La stratégie de modélisation employée doit être au

[1] LUNAM – Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) – GERS-LEE, route de Bouaye – CS 4 – 44344 Bouguenais cedex
[2] Univ-Lyon – INSA de Lyon – LMFA – UMR 5509 – Villeurbanne
[3] Laboratoire DEEP, Université de Lyon – INSA Lyon – 34, avenue des Arts – 69621 Villeurbanne

préalable validée à l'aide de données expérimentales. Dans un deuxième temps, la réponse de capteurs est simulée en exploitant les résultats numériques des champs de vitesse. Il s'agit de reproduire le principe d'échantillonnage spatial des capteurs considérés et d'en extraire une vitesse moyenne. Enfin, dans un troisième temps, l'erreur est calculée en fonction des caractéristiques et de la position des capteurs. Cette erreur est la différence entre la vitesse moyenne calculée directement à partir de la simulation numérique et la valeur fournie par le capteur considéré. L'analyse de ces erreurs permet de formuler des recommandations sur l'emplacement optimal des capteurs à l'aval de singularités rencontrées en réseau d'assainissement et l'ordre de grandeur des incertitudes.

La première section de cet article présente les deux types de capteurs (cordes et Doppler) en détaillant leur mode d'échantillonnage spatial ainsi que les sources d'erreur associées. La deuxième section présente la démarche de modélisation numérique ainsi que les domaines de calculs associés à l'aval respectivement d'une confluence et d'un coude. Enfin, la troisième partie présente les résultats en matière de réponse des capteurs à ces champs de vitesse et d'erreurs pour les différentes configurations considérées.

1. Techniques de mesures de la vitesse moyenne

Deux technologies communément utilisées pour les mesures de vitesse ont été considérées : les capteurs ultrasonores à temps de transit (ou cordes) et les capteurs ultrasonores à effet Doppler. Les avantages et inconvénients de ces technologies sont présentés par BERTRAND-KRAJEWSKI et coll. [2000]. Nous ne détaillerons ici que les points relatifs à l'échantillonnage spatial réalisé par ces deux types de capteurs.

1.1. Mesure par temps de transit ou « cordes »

Le principe de cette méthode repose sur l'émission d'ondes ultrasonores entre deux transducteurs qui sont positionnés à la même altitude z, de part et d'autre de la section, selon une direction présentant un angle α avec l'axe de la canalisation. Comme les capteurs A et B sont alternativement émetteurs et récepteurs, ils mesurent d'une part le temps t_1 mis par un signal acoustique issu de A pour atteindre B et inversement un temps t_2 mis par un même signal acoustique issu de B pour atteindre A. On peut montrer que le dispositif mesure en réalité la moyenne arithmétique des projections des vitesses sur le segment AB

$$V_{AB} = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 \cdot t_1} \right) \qquad \text{[Équation 1]}$$

Dans la suite, V_{AB} est notée $\widehat{V'}(z)$ avec le signe prime qui indique la projection sur le segment de mesure et le « chapeau » qui indique la moyenne spatiale sur ce segment.

On en déduit la composante longitudinale $\widehat{V'_x}(z)$ à l'altitude z par la relation *[2]* :

$$\widehat{V'_x}(z) = \frac{L}{2\cos(\alpha)} \frac{(t_2 - t_1)}{(t_2 \cdot t_1)} \qquad \text{[Équation 2]}$$

Cette *équation 2* suppose que la moyenne des composantes transversales $V'_y(z)$ est négligeable. La *figure 1* montre l'erreur commise en un point en négligeant cette composante : $V(z)$ est la vitesse obtenue par le code numérique et $V_x(z)$ sa composante longitudinale (« débitante »), $V'(z)$ sa projection sur la corde AB, et $V'_x(z)$ la composante longitudinale finalement estimée par le capteur. L'erreur est alors la différence entre $V'_x(z)$ et $V_x(z)$, et ne peut pas être évitée : par nature, une corde ne mesure qu'une composante des vitesses, différente de la composante longitudinale, et cette dernière nécessite une hypothèse d'écoulement 1D seulement suivant x pour être correctement évaluée. Une autre erreur est commise en supposant que la moyenne des composantes longitudinales de vitesse le long du segment AB est la même que la moyenne des composantes longitudinales de vitesse le long d'un segment perpendiculaire à l'axe de la canalisation (A'B').

Dans le cas d'une corde unique, la vitesse moyenne dans la section est égale à la vitesse moyenne le long de la corde. Dans le cas d'un système à plusieurs cordes alignées verticalement, la norme NF EN ISO 6416 [AFNOR, 2005] propose deux options pour le calcul de la vitesse moyenne dans la section. Pour les simulations des réponses de capteur, nous avons utilisé l'option « mid-section ». Son principe est d'associer à chaque corde de vitesses une surface répartie de part et d'autre de celle-ci. On calcule le débit

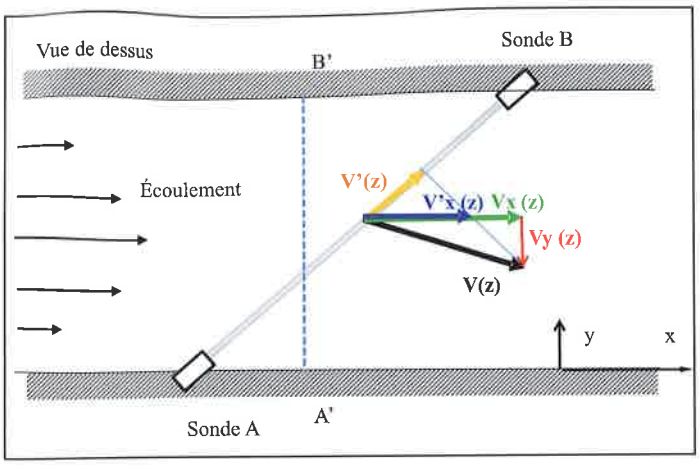


Figure 1. Schéma de principe d'une corde de vitesse (vue en plan horizontal) montrant les différentes composantes du champ de vitesse en un point intervenant dans le processus de mesure

traversant chaque surface en multipliant la vitesse moyenne $\widehat{V_x'}(z)$ le long d'une corde par sa surface correspondante, sachant qu'une surface additionnelle sans corde est utilisée au fond. La vitesse moyenne finale est calculée en considérant les contributions sur toute la section.

1.2. Débitmètre à effet Doppler

Un débitmètre à effet Doppler est un appareil qui émet des ondes ultrasonores suivant un cône d'émission à la fréquence f_s (en général entre 0,5 et 1 MHz). Lorsqu'elles rencontrent un contraste de densité (différente de celle de l'eau, constitué en pratique par des particules pouvant être solides ou gazeuses), les ondes sont réfléchies, notamment vers le débitmètre, avec une fréquence $f_s + f_{D,i}$ où la fréquence Doppler $f_{D,i}$ est proportionnelle à la vitesse V_{ri} de la particule i suivant la direction capteur-particule *(figure 2)* soit :

$$V_{ri} = \frac{c \cdot f_{Di}}{2 f_s} \qquad \text{[Équation 3]}$$

où c est la célérité des ultrasons dans l'eau.

La valeur mesurée par le capteur (notée $\widehat{V_r}$) correspond à la moyenne des vitesses V_{ri} de chaque particule dans le cône pondérée par la distance d_i entre le capteur et la particule à la puissance quatre. Cette pondération purement géométrique correspond à la répartition de l'énergie émise par le capteur sur une surface sphérique de rayon d_i lorsqu'elle atteint la particule i, puis de la répartition de l'énergie rétrodiffusée par la particule sur une surface sphérique de rayon d_i lorsqu'elle atteint le capteur *[équation 4]*.

$$\widehat{V_r} = \frac{\sum_i^n \frac{V_{ri}}{d_i^4}}{\sum_i^n \frac{1}{d_i^4}} \qquad \text{[Équation 4]}$$

La grandeur que l'on cherche à mesurer étant la vitesse longitudinale locale $\widehat{V_x}$ dans l'axe de l'écoulement, celle-ci est calculée à partir de la vitesse radiale mesurée par :

$$\widehat{V_x} = \frac{\widehat{V_r}}{\cos(\overline{\theta})} \qquad \text{[Équation 5]}$$

où $\overline{\theta}$ est l'angle principal d'émission du capteur.

Comme pour les cordes, cette extrapolation d'une composante mesurée à la composante longitudinale est basée sur une hypothèse : l'influence négligeable des composantes verticales et transversales sur la valeur moyenne obtenue. La *figure 2* montre que si la vitesse V de la particule i présente une composante verticale V_z non négligeable, la composante longitudinale réelle (V_x en vert) diffère de la composante longitudinale estimée par le capteur (V'_x en bleu), elle-même étant la projection suivant l'axe de l'écoulement de la composante radiale V_{ri}. Il en sera de même si la composante transversale de la vitesse n'est pas négligeable puisqu'en réalité la zone échantillonnée par le capteur est un volume et il faut extrapoler le raisonnement en 3D.

Pour cette étude, on considérera les capteurs décrits en *tableau I* et *figure 2*, placés au fond de la conduite en son centre à différentes distances de la singularité. Le capteur à effet Doppler effectue une mesure du champ de vitesse dans un certain volume conique

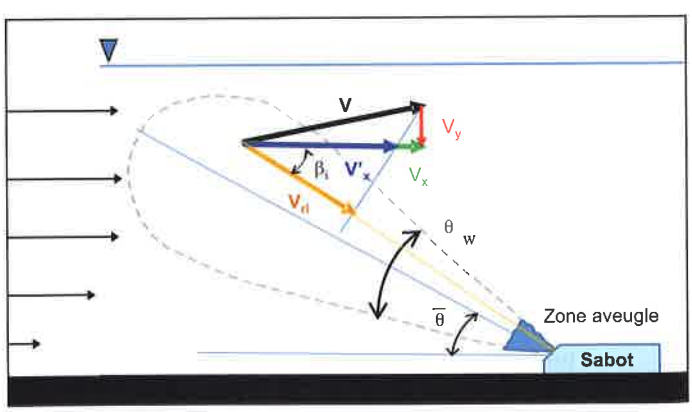


Figure 2. Paramètres caractéristiques d'un débitmètre à effet Doppler (schéma en plan vertical adapté de la spécification technique ISO 15769)

Capteur	Fréquence (MHz)	Angle d'émission (°)	Angle d'ouverture (°)	Portée (m)
B (Isco 4250)	0,5	31	10	0,8
C (Mainstream)	1,0	14	24	1,2

Tableau I. Caractéristiques des capteurs Doppler utilisés ici [LARRARTE *et al.*, 2008]

(*figure 2*) dont les caractéristiques sont définies par la norme internationale ISO 15769 [ISO, 2010] :

– angle d'émission $\overline{\theta}$;

– portée ;

– ouverture du faisceau ultrasonore θ_w ;

– fréquence d'émission f_s ;

– analyse du signal.

Nous tenons à souligner que notre propos n'est pas de juger les matériels, mais uniquement d'attirer l'attention sur le fait que chacun a des caractéristiques propres. Et comme chaque site est particulier, notamment dans les gammes de hauteurs d'eau et de vitesse, un matériel jugé le plus adapté à un site pourrait ne pas l'être à un autre.

En conclusion, il apparaît dans les schémas en *figures 1* et 2 que les erreurs d'estimation du débit par ces deux capteurs proviennent :

• 1°) du fait que les volumes de mesure des capteurs sont spatialement limités :

– à une altitude pour chaque corde,

– au cône insonifié pour le capteur Doppler ;

et que seule la vitesse dans ces zones de mesure est prise en compte lors du calcul de la vitesse moyenne $\hat{U}$;

• 2°) de la présence des composantes non longitudinales des vitesses (composante transverse V_y, composante verticale V_z) dans la zone de mesure.

2. Présentation de la démarche de modélisation et des configurations étudiées

Les données utilisées dans cet article sont majoritairement des résultats numériques issus de simulations d'écoulement obtenues avec le code de calcul commercial StarCCM+ qui résout les équations de continuité et de Navier-Stokes moyennées par décomposition de Reynolds (RANS) qui expriment la conservation de la masse dans le domaine de calcul ainsi que la conservation de la quantité de mouvement.

Les travaux antérieurs ont montré que les écoulements en réseau d'assainissement sont tridimensionnels. Ainsi, même si la composante de la vitesse parallèle à l'axe de la conduite est prépondérante, les composantes transversales et verticales sont présentes sous l'effet de courants secondaires avec un caractère anisotrope de la turbulence (grandeurs caractéristiques différentes dans les trois directions de l'espace). Les travaux de STOVIN et coll. [2002], de LARRARTE et coll. [2007] et de BONAKDARI et coll. [2008] ont montré l'influence du modèle de turbulence sur la représentation de la physique de l'écoulement et, en particulier, desdits courants secondaires. Afin de bien reproduire la physique de l'écoulement, un schéma de fermeture de second ordre de type *Reynolds stress model* (RSM) est nécessaire : le schéma SSG proposé par SPEZIALE et coll. [1991] a été retenu.

2.1. Aval d'une confluence

Le domaine considéré reproduit le dispositif expérimental disponible à l'INSA de Lyon (voir MIGNOT et coll. [2012]) et consiste en une intersection de deux canaux horizontaux de section rectangulaire en verre, l'un de 4,9 m de long (suivant l'axe x) et l'autre de 2 m de long (suivant l'axe y), se rejoignant en formant un angle droit. Les branches présentent toutes la même largeur B = 30 cm. La surface libre est considérée comme plane et de hauteur fixe (h = 12 cm) et connue, et une condition de glissement pure (*Rigid-lid*) est utilisée pour la représenter. Comme montré sur la *figure* 3, le domaine est composé de deux entrées (selon les axes x et y) et une sortie (selon l'axe x aval). Les conditions limites utilisées sont les débits aux deux entrées : Q_u à l'amont et Q_L pour la branche latérale et une condition de pression imposée en sortie où le débit vaut $Q_d = Q_u + Q_L$. Le maillage est régulier, structuré et un raffinement du maillage est utilisé dans la zone de l'intersection. Ce modèle numérique est analogue à celui proposé par

MOMPLOT et coll. [2013] où le lecteur pourra trouver tous les détails associés.

Des mesures expérimentales du champ de vitesse ont été effectuées pour un écoulement de référence (R_q = Q_L/Q_u = 3, B/h = 2,5) afin de valider la capacité du code de calcul à prédire avec précision le champ de vitesse dans l'intersection et la branche aval. Ces mesures utilisent la méthode dite de vélocimétrie par image de particules (PIV) bidimensionnelle (V_x,V_y) sur le dispositif expérimental du Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA), à l'INSA de Lyon. Des détails concernant ces mesures de vitesse dans la confluence sont fournis par MIGNOT et coll. [2014]. La validation du code de calcul à partir des mesures de laboratoire a déjà été présentée par MOMPLOT et coll. [2013].

Les écoulements calculés par cette méthode par MOMPLOT et coll. [2013] permettent notamment de retrouver les principales formes d'écoulement ayant lieu dans la branche aval des confluences à 90° d'écoulement à surface libre, notamment décrite par GURRAM et coll. [1997], WEBER et coll. [2001], SHAKIBAINIA et coll. [2010] ou plus récemment MIGNOT et coll. [2014]. Ces principales structures d'écoulement observées, et indiquées sur la *figure 4*, sont :

– une zone de recirculation dans la branche aval au sein de laquelle la norme de la vitesse est fortement réduite, suivie de son sillage vers l'aval ;

– une zone de contraction qui donne lieu à une forte accélération de l'écoulement sur le côté de la zone de recirculation ;

– et la présence de courants secondaires suivant les plans (y,z).

Les configurations d'écoulement utilisées pour tester les capacités des deux capteurs sont rassemblées dans deux séries : S1 et S2. Pour les écoulements de la série S1, le même écoulement est considéré en aval : la hauteur d'eau (h = 12 cm) et le débit (Q_d = 4 L/s) sont gardés constants ainsi donc que la vitesse moyenne ($\overline{U}$ = 0,11 m/s) et les nombres de Froude (Fr = 0,1) et de Reynolds (Re ~ 30 000). Le seul paramètre qui varie est le rapport des débits (et donc des vitesses moyennes) des deux branches amont, depuis un débit amont dominant (Q_u > Q_d, soit R_q < 1) jusqu'à un débit latéral Q_L dominant (R_q > 1). La série S1 représente donc des situations pour lesquelles les apports d'eau en provenance de différentes parties amont du réseau évoluent, tout en gardant le débit d'eau total identique. Cela peut représenter notamment une variation de débits à la suite d'un ruissellement de surface produit par la distribution des pluies sur ces deux zones. Pour les écoulements de la série S2, le rapport des débits amont est gardé constant (Q_u = Q_L, soit R_q = 1), mais le rapport d'aspect B/h de la branche aval (B représente la largeur de la branche et h la hauteur d'eau) évolue, tout en gardant les nombres de Froude et de Reynolds identiques dans la branche aval. L'objectif de cette série de tests (S2) est de prendre en compte l'effet de faible ou fort rapport d'aspect des canaux et donc l'effet de la faible ou forte profondeur d'eau sur la distribution du champ de vitesses à l'aval de la confluence.

Pour chaque configuration de ces deux séries, la mesure de débit est simulée à l'aide de chacun des deux capteurs, localisés à différentes positions dans la branche aval de la jonction. Pour le capteur Doppler, cette distance correspond à la localisation virtuelle du sabot (*figure 2*) et pour la corde il s'agit du centre de la corde (segment A'-B' sur la *figure 1*). Une fois cette mesure virtuelle effectuée, l'erreur E sur le débit obtenu par cette mesure est définie par $E = (Q_E - Q_d)/Q_d$ avec Q_E le débit estimé à partir des données issues de la modélisation de la réponse du capteur et Q_d le débit réel de la simulation numérique, de sorte que E > 0 équivaut à une surestimation du débit (et inversement).

Un système à deux cordes est utilisé ici. Les cordes sont ici placées de façon optimale au tiers et aux deux

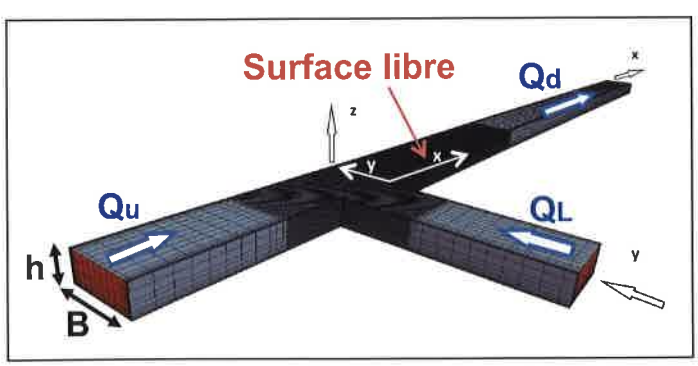
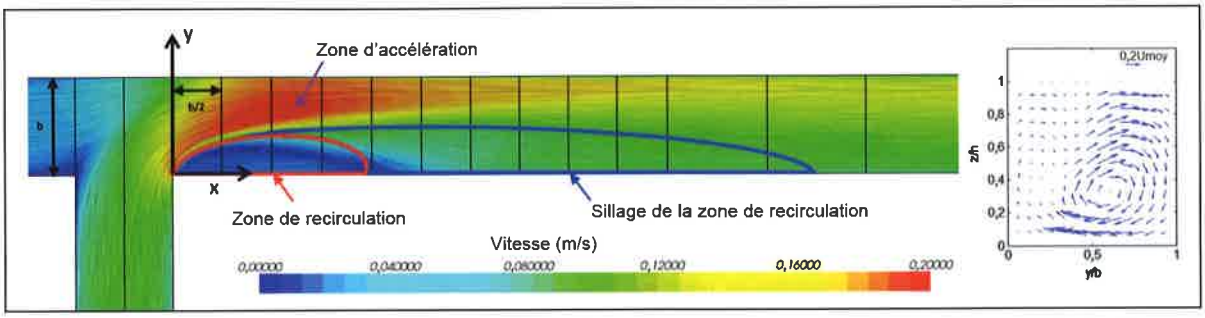


Figure 3. Domaine de calcul et maillage de la jonction incluant les conditions limites



À gauche : distribution de la norme de la vitesse de surface calculée dans l'intersection et la zone aval de la jonction pour l'écoulement R_q = 3 et B/h = 2,5, et à droite le champ de vitesse secondaire (V_y,V_z) correspondant dans le plan (y,z) à la section x/B = 1.

Figure 4. Champ de vitesse horizontal à l'aval de la confluence

tiers de la hauteur maximale h. Le débit estimé vaut alors :

$$Q_E = \frac{h}{6}\left((k+2)\,\widehat{V_x'}(z_1)\,b_1 + 3\,\widehat{V_x'}(z_2)\,b_2\right) \quad \text{[Équation 6]}$$

Avec $\widehat{V_x'}(z_1)$ et $\widehat{V_x'}(z_2)$ les vitesses moyennes longitudinales estimées le long des cordes situées respectivement aux altitudes Z_1 et Z_2, b_1 et b_2 les largeurs de canal rectangulaire aux deux altitudes, égales à B ici et k = 0,8 obtenu après avoir effectué une recherche de la valeur optimale au sein de la gamme proposée dans la norme : k = [0,4 ; 0,8].

2.2. Aval d'un coude

Une analyse statistique des réseaux d'assainissement urbains de trois des plus grandes villes de France a montré que plus de 50 % des collecteurs sont de sections circulaires. Cette partie de l'étude se centre donc sur cette géométrie. LARRARTE et coll. [2010] ont étudié l'influence du rayon de courbure d'une conduite courbée sur le champ de vitesse et ont conclu que ce paramètre n'a qu'une influence négligeable sur l'écoulement en aval d'un coude. Dans cette étude, un rayon de courbure de R = 9 m a été considéré (*figure 5*). Cette même étude a montré qu'une longueur de 50 m est nécessaire en amont du coude pour permettre que le champ de vitesse calculé soit pleinement établi à l'entrée du coude. Cette étude a enfin montré que la rugosité des parois du collecteur a une influence très limitée, elle a été prise égale à 2 mm dans cette étude pour représenter du béton de bonne qualité. À l'amont du domaine de calcul (*figure 5a*), la vitesse a une valeur uniforme V sur toute la section, la hauteur d'eau h est spécifiée. À l'extrémité aval, une condition de pression hydrostatique est appliquée. L'interface eau-air est représentée par une approche diphasique qui fait appel à la méthode *volume of fluid* (VOF) [HIRT et NICHOLS, 1981].

Le maillage utilisé (*figure 5b*) est de type polyédrique car, selon la société qui commercialise le code, ces formes génèrent une diffusion numérique moins importante du fait que les gradients sont mieux approchés grâce à un nombre important de faces par cellule (de l'ordre de 10). La zone de proche paroi est traitée avec un maillage local dit *prism layer model* qui est constitué de prismes orthogonaux placés tout le long des parois. La géométrie de ces cellules permet à l'écoulement de rester aligné avec le maillage et donc de minimiser les erreurs de diffusion numérique.

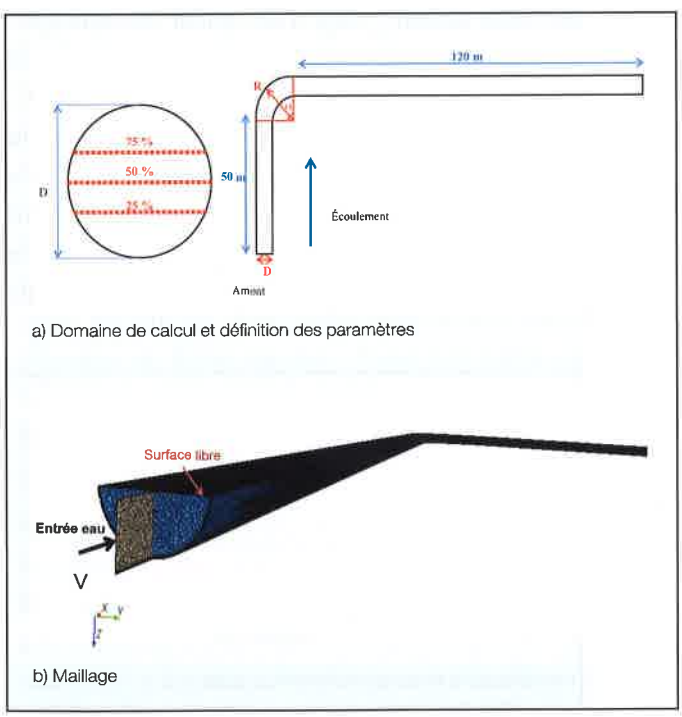
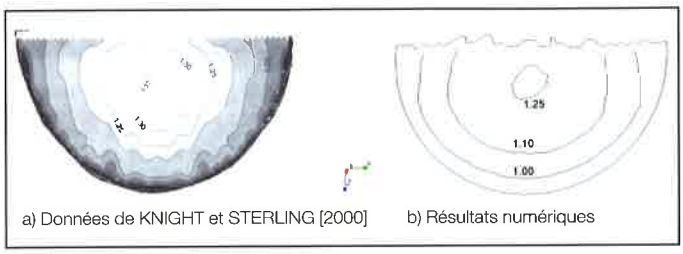


Figure 5. Domaine de calcul et maillage en présence d'un coude



a) Données de KNIGHT et STERLING [2000] b) Résultats numériques

Figure 6. Comparaison des isovaleurs de vitesse normalisée mesurée [KNIGHT et STERLING, 2000] et simulée ; les vitesses sont normalisées par la vitesse moyenne obtenue à partir du champ de vitesses en linéaire de conduite à section circulaire

La validation des résultats numériques obtenus à l'aval du coude est d'abord basée sur la comparaison avec les résultats expérimentaux de KNIGHT et STERLING [2000] sur un linéaire de conduite circulaire (donc en l'absence de coude). La *figure 6* représente les mesures expérimentales de la littérature ainsi que les résultats numériques correspondants dans un collecteur circulaire de 1,23 m de diamètre pour un taux de remplissage de 50 % et une vitesse moyenne de 0,493 m/s. Cette comparaison montre que les options de calculs permettent de reproduire le champ de vitesse mesurée et en particulier le « *dip phenomenon* », soit le fait que la vitesse maximale se situe en dessous de la surface libre.

Dans un deuxième temps, la validation du code de calcul est basée sur la comparaison avec un champ de vitesse mesuré à l'aide d'un capteur électromagnétique de la marque OTT dans un coude en condition de terrain, et présenté par LARRARTE et coll. [2004]. Ce champ de vitesse a été mesuré et calculé à 25 m (19B avec B la largeur de la conduite au niveau de la surface libre) à l'aval d'un coude de 90° présentant un rayon de courbure de 9 m. La *figure 7* compare les distributions d'isovaleurs de vitesse longitudinale normalisée par la vitesse moyenne dans une section de la conduite. Les résultats expérimentaux montrent une réelle asymétrie générée par la présence du coude. Il apparaît que la simulation est apte à représenter fidèlement le champ de vitesse mesuré.

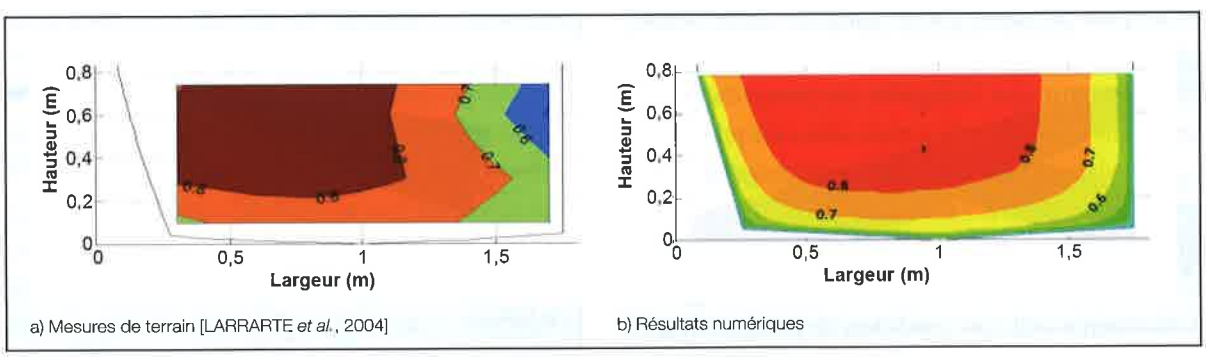
Le *tableau II* présente les trois configurations géométriques étudiées ci-après où D est le diamètre du collecteur, h la profondeur d'eau au centre du collecteur de sorte que h/D est son taux de remplissage et α l'angle du coude.

Paramètres	α (°)	D (m)	h/D (%)	V (m/s)
Configurations	90	1,5	25 - 50 - 75	0,5

Tableau II. Cas d'étude pour les conduites coudées

3. Résultats

Les mesures de vitesses ou autres variables en réseaux d'assainissement se font par des capteurs dont le positionnement requiert une attention particulière. Notamment, l'utilisateur doit veiller dans la mesure du possible à s'écarter des singularités hydrauliques susceptibles de perturber le profil de vitesses telles que l'aval d'un coude, les apports latéraux, une chute, etc. Il est utile de vérifier au préalable les spécifications annoncées par les fabricants de capteurs, car elles sont parfois optimistes par rapport aux conditions d'emploi *in situ* [BERTRAND-KRAJESWSKI *et al.*, 2000]. Ainsi, le fabricant HACH [2008] recommande de placer le débitmètre à une distance d'au moins 10B en aval du coude. Quant au fabricant NIVUS [1999], il indique que pour assurer une mesure optimale, le capteur doit être installé



a) Mesures de terrain [LARRARTE *et al.*, 2004] b) Résultats numériques

Figure 7. Comparaison expérimentale et numérique de champs de vitesses en aval d'un coude

	V < 1,0 m/s	V > 1,0 m/s
0° < α < 15°	L ≥ min. 3*B	L ≥ min. 5*B
15° < α < 45°	L ≥ min. 5*B	L ≥ min. 10*B
45° < α < 90°	L ≥ min. 10*B	L ≥ min. 20*B

Tableau III. Positionnement du capteur selon NIVUS [1999]

à une distance minimale par rapport à la sortie d'une déviation en fonction de l'angle α. Le *tableau III* récapitule ces distances.

3.1. Aval d'une confluence

3.1.1. Résultats concernant la modélisation de la réponse du capteur à deux cordes

La *figure 8* montre que le débit est sous-estimé par le capteur à deux cordes pour tous les écoulements des deux séries, avec une sous-estimation maximale qui se situe systématiquement à une distance autour de deux largeurs de la jonction (x/B = 2-2,5). Cette sous-estimation peut atteindre des valeurs jusque 18 % du débit. Plus à l'aval, cette sous-estimation diminue et est réduite à moins de 5 % à une distance de 3 à 5 largeurs à l'aval de la confluence. Il apparaît aussi que cette sous-estimation augmente lorsque le rapport de débit R_q augmente et diminue lorsque le rapport d'aspect B/h augmente. Les conditions d'écoulement les plus défavorables pour ces capteurs sont obtenues lorsque R_q et h/B sont élevés, c'est-à-dire que le débit latéral domine et que l'écoulement est profond.

Les deux principales sources d'erreur qui interviennent dans l'estimation du débit par ce type de capteur sont :

– l'effet des courants secondaires (V_y,V_z) dont les effets restent ici très limités ;

– l'hétérogénéité de la distribution de vitesse longitudinale.

La *figure 9* présente la distribution de vitesse longitudinale dans la section perpendiculaire à l'écoulement et selon l'axe de la corde respectivement ; et cela suivant deux sections situées près de la jonction (x/B = 2) et plus à l'aval (x/B = 9). Il apparaît qu'à x/B = 2, le champ de vitesse selon la corde pénètre au sein de la zone de recirculation (zone lente, en bleu), contrairement au profil perpendiculaire, de sorte que les vitesses lentes affectent fortement la section vue par la corde. À l'inverse, le profil suivant l'axe de la corde traverse la zone d'accélération (zone rapide, en orange foncé) plus à l'aval que la section perpendiculaire, donc dans une région où l'écoulement est plus lent, de sorte que la corde voit des vitesses maximales moins fortes que la section perpendiculaire. Au final, ces deux aspects expliquent la sous-estimation du débit estimé par les cordes. Par ailleurs, le fait que la sous-estimation du débit en *figure 9* augmente lorsque R_q augmente s'explique par le fait que la largeur de la zone de recirculation augmente aussi (voir BEST et REID [1984] et GURRAM et coll. [1997]) et donc les effets décrits précédemment sont amplifiés. De plus, ces mêmes auteurs ont montré qu'une augmentation de R_q génère aussi une augmentation de la longueur de cette zone de recirculation, de sorte que les effets décrits ici se font ressentir plus à l'aval, en accord avec les courbes de la *figure 8*.

Pour ce qui concerne l'effet du rapport d'aspect de la série S2, il apparaît que la largeur de la zone de recirculation ne varie pas notablement lorsque B/h augmente, mais que sa longueur augmente. En conséquence, la distribution de vitesse vue par la corde oblique devient similaire à celle de la section transverse équivalente ; et donc l'erreur d'estimation du débit diminue (voir *figure 8b*). Il est à noter que si la corde était orientée avec le même angle, mais de façon opposée, la corde à x/B = 2 ne pénétrerait pas du tout dans la zone de recirculation et traverserait une zone d'accélération particulièrement rapide, de sorte que le débit serait cette fois surestimé. Ainsi, on peut se demander si une solution ne serait pas que les deux cordes superposées soient orientées de façon opposée : l'une vers l'aval (de A vers B, *figure 1*) et l'autre vers l'amont (de B vers A, *figure 1*).

Si l'on se réfère maintenant à la zone x/B = 9, il apparaît que les écoulements vus par la section transverse et la corde sont très similaires, tant pour la série S1 que la série S2, ce qui explique que le débit à cette section aval est relativement bien estimé par le capteur, avec une erreur inférieure à 5 % quel que soit l'écoulement sur la *figure 8*.

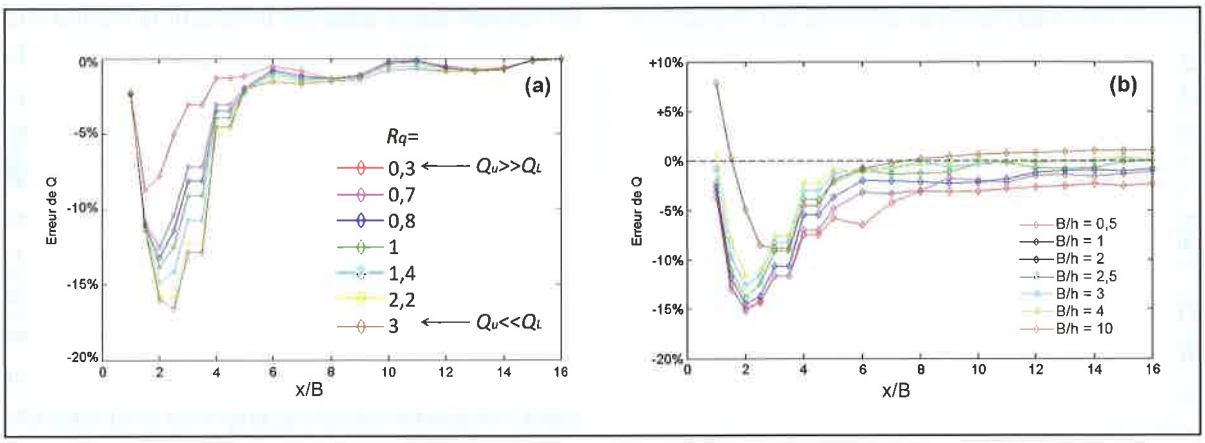


Figure 8. Erreurs d'estimation de débit par le système deux cordes pour la Série 1 (a) avec B/h = 2,5 et R_q variant de 0,3 à 3 et la Série 2 (b) avec R_q = 1 et B/h variant de 0,5 à 10

Au final, il apparaît que l'hétérogénéité de vitesse longitudinale contribue pour environ 85 % dans la part des erreurs d'estimation du débit alors que les composantes transverse et verticale de l'écoulement ne contribuent que pour environ 15 %. En conclusion, il est recommandé, dans la mesure du possible, de placer le capteur à deux cordes dans une section où la distribution de l'écoulement est suffisamment uniforme, soit à une distance à l'aval de la confluence supérieure à six largeurs de conduite.

3.1.2. Résultats concernant la modélisation de la réponse du capteur Doppler

Le capteur considéré ici est le capteur Doppler B du *tableau I* pour lequel on teste l'effet de son positionnement à différentes distances à l'aval de la confluence.

La *figure 10* révèle que les débits mesurés par le capteur Doppler sont systématiquement surestimés. Cette surestimation vaut environ 30 à 65 % lorsque le capteur est placé très près de la jonction (x/B = 1-3) et diminue rapidement lorsque le capteur Doppler est placé plus à l'aval.

Tout comme pour les cordes, il apparaît que, dans les cas considérés ici, l'effet des courants secondaires est négligeable (cette source d'erreur représente 5 % des erreurs au maximum) et que les erreurs d'estimation des débits de la *figure 10* proviennent en grande majorité de l'hétérogénéité spatiale de la vitesse longitudinale. Ces effets sont explicités sur la *figure 11* qui montre qu'étant donné que le Doppler est positionné au centre de la conduite, il se trouve

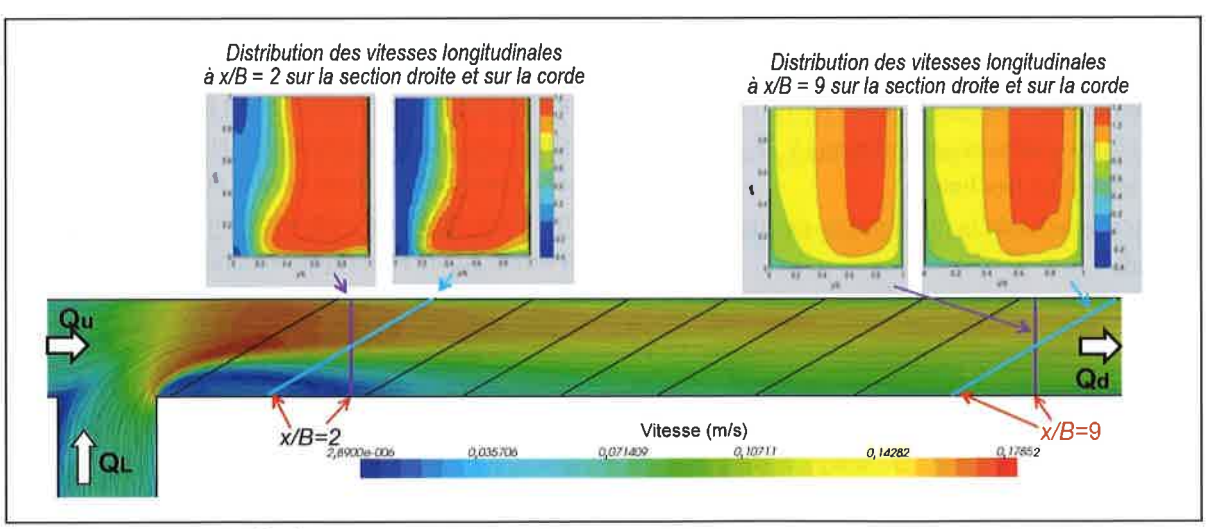


Figure 9. Vue du dessus de l'écoulement avec R_q = 1 et B/h = 2,5, avec en noir les lignes correspondant à une sélection d'axes de cordes ; en violet et bleu clair une sélection de deux sections à x/B = 2 et 9 représentant une section perpendiculaire (violet) et une section suivant l'axe des cordes (bleu clair) et, au-dessus, la distribution de vitesse longitudinale suivant ces sections

placé dans la zone d'accélération (en rouge sur la *figure 11*) où la vitesse longitudinale est nettement plus forte que la vitesse moyenne. Cela a pour effet d'estimer un débit très supérieur au débit réel. De plus, nous avons déjà montré dans les sections précédentes que l'augmentation du débit latéral Q_L (en augmentant R_q) tend à augmenter la largeur de la zone de recirculation et donc aussi à augmenter l'accélération du fluide dans la zone contractée ; ainsi lorsque R_q augmente, la surestimation du débit dans cette région près de la jonction augmente *(figure 10a)*. En revanche, plus à l'aval (x/B = 3-10), cette tendance s'inverse : l'erreur diminue lorsque R_q augmente, cela est dû au fait que la largeur du sillage à l'aval de la zone de recirculation augmente aussi et donc le capteur Doppler se retrouve dans le bord de ce sillage (non montré ici) : la survitesse diminue donc. Cela ne veut pas dire que l'écoulement gagne en uniformité lorsque R_q augmente mais plutôt que le capteur Doppler se trouve à l'interface entre la zone d'accélération et le cœur de la zone de sillage et donc finalement dans une zone où la vitesse longitudinale est proche de la vitesse moyenne.

Pour ce qui concerne l'effet du rapport d'aspect B/h sur l'erreur de vitesse estimée par le capteur Doppler, la situation est la suivante : les erreurs sont minimales pour un rapport d'aspect moyen (B/h = 2) et ces erreurs augmentent lorsque B/h augmente ou diminue. Ces deux tendances s'expliquent à l'aide des deux observations suivantes. Premièrement, il apparaît que lorsque B/h augmente (que la profondeur de l'écoulement diminue) l'écoulement devient plus homogène sur l'axe vertical : les différences entre l'écoulement de surface et près du fond diminuent. Ainsi, alors que pour B/h = 2,5, la vitesse longitudinale vue par le Doppler à x/B = 2 est plus forte à la surface qu'au fond (voir la vue de côté de la *figure 11*

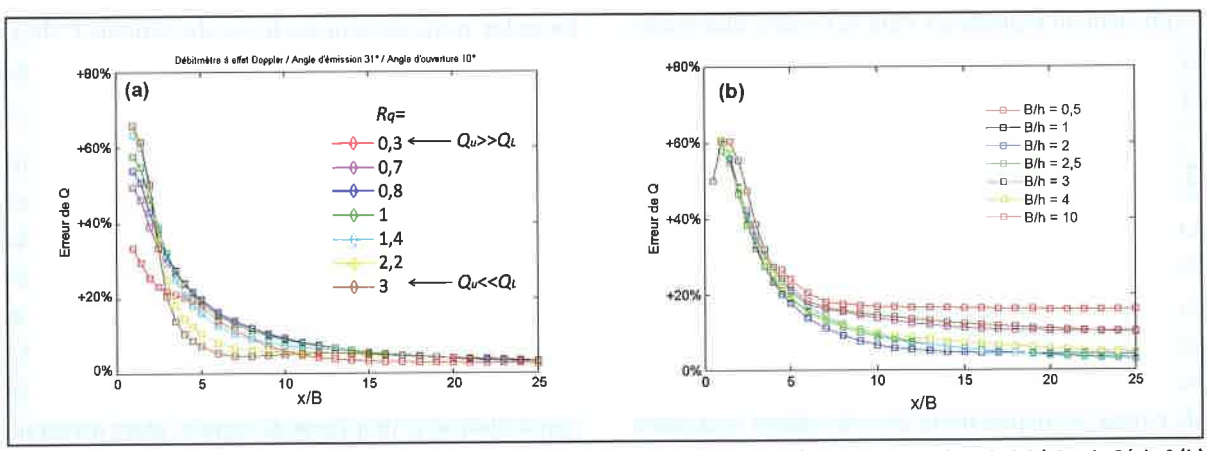


Figure 10. Erreurs d'estimation de débit par le système Doppler pour la Série 1 (a) avec B/h = 2,5 et Rq variant de 0,3 à 3 et la Série 2 (b) avec R_q = 1 et B/h variant de 0,5 à 10

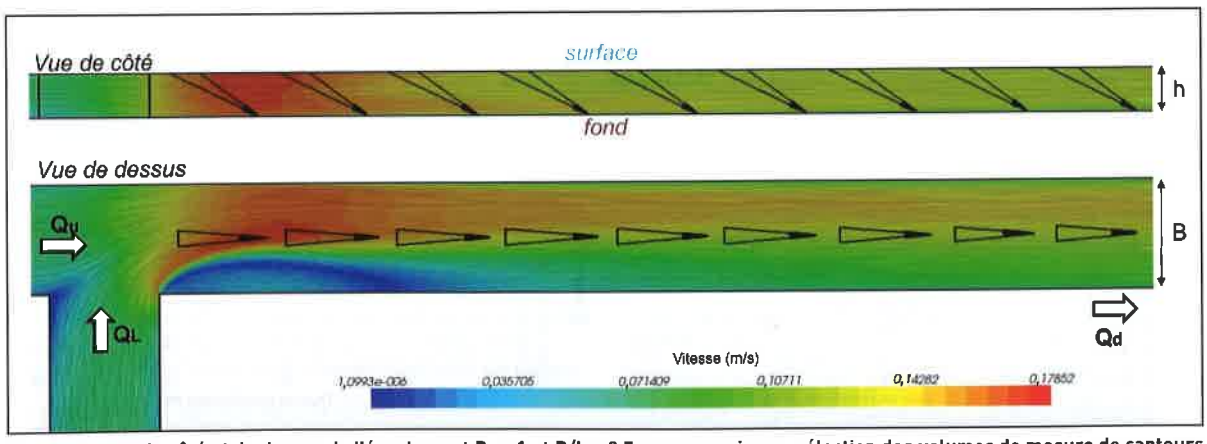


Figure 11. Vue de côté et du dessus de l'écoulement R_q = 1 et B/h = 2,5, avec en noir une sélection des volumes de mesure de capteurs Doppler, présentant en gras leur zone aveugle

à x/B = 2), pour B/h =10, cette distribution est plus homogène, proche de la vitesse maximale et donc le débit estimé est plus important. Deuxièmement, il apparaît que lorsque B/h diminue pour des valeurs inférieures à 2 (que l'écoulement devient profond), la zone de recirculation devient confinée dans la zone proche de la surface et est très courte et étroite dans la zone proche du fond ; en conséquence, les vitesses longitudinales mesurées proches du fond deviennent plus élevées et le débit estimé augmente (voir *figure 10b*).

En conclusion, une distance d'environ 10 largeurs (x/B > 10) est requise afin d'estimer le débit à l'aide du capteur Doppler avec une précision de l'ordre de 5 % pour tout rapport de débit avec un rapport d'aspect moyen (B/h = 2-4), et que cette erreur augmente jusque 15 à 20 %, même pour des distances beaucoup plus élevées (> 25 largeurs) si l'écoulement est moins ou plus profond (B/h > 4 ou < 2 respectivement). Il est à noter que, dans cette étude, la présence du sabot du capteur Doppler n'a pas été explicitement représentée dans le modèle numérique et son influence sur l'écoulement pourra légèrement affecter les résultats présentés ici.

3.2. Aval d'un coude

Le *tableau IV* présente les résultats obtenus à partir des simulations pour la canalisation circulaire de la *figure 5*. Les mesures effectuées par les cordes sont peu influencées par le coude. En effet, celui-ci a surtout pour effet de modifier les profils transversaux de vitesse, en déportant la zone de vitesse maximum vers l'extrados en sortie de courbe. Or les cordes appréhendent de manière très correcte la vitesse moyenne sur une transversale. Les erreurs de débit

	Remplissage 25 % (1 corde)	Remplissage 50 % (2 cordes)	Remplissage 75 % (3 cordes)
Erreur (%)	12	7	5

Tableau IV. Erreur d'estimation de débit obtenu avec un débitmètre à cordes localisé à une distance 5B à l'aval d'un coude

calculées à une distance 5B du coude sont en effet limitées à moins de 15 %, quel que soit le taux de remplissage de la conduite. Par ailleurs, pour une position donnée du capteur, cet effet dépend du contexte hydraulique : l'augmentation du taux de remplissage semble tendre à réduire les erreurs d'estimation du débit à la position 5B. Il est à noter que, dans ces simulations, les variations de taux de remplissage pour une vitesse donnée sont obtenues en faisant varier la pente du radier. Les variations de pente de la ligne d'eau induites par une influence aval n'ont pas été étudiées.

Pour ce qui concerne l'estimation de débit à l'aval du coude dans cette canalisation à l'aide d'un capteur Doppler, nous présentons le cas du capteur C dont les caractéristiques sont données au *tableau I*. Sa zone morte est égale à 2 cm [NEOTEK, 2008].

La *figure 12* montre que, dans toutes les configurations, la perturbation du champ de vitesses par le coude a un effet sensible sur le débit estimé et d'autant plus marqué que le point de mesure est proche de la singularité et cela, quelle que soit la vitesse de l'écoulement dans la gamme considérée : on peut atteindre un écart de 25 à 30 % pour un capteur situé à 5B à l'aval du coude, alors qu'on ne dépasse pas 15 % pour un capteur situé à 20B. On note que le taux de remplissage le plus pénalisant est celui qui correspond à la plus faible hauteur d'eau. Il

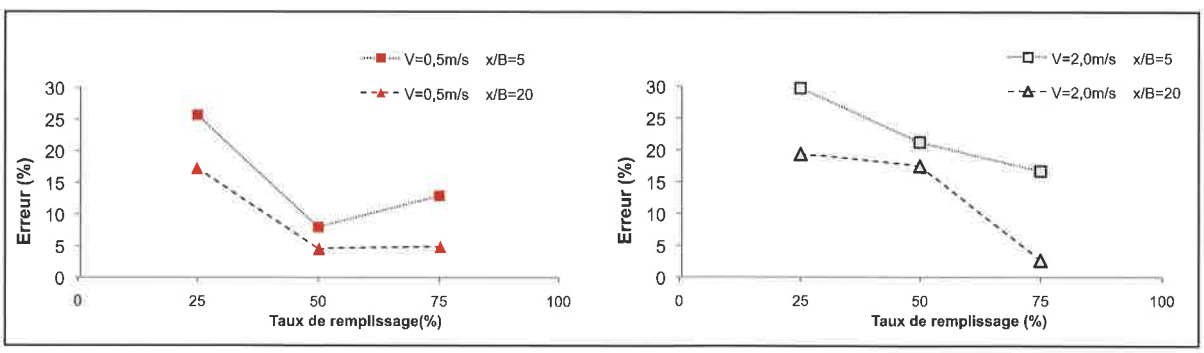


Figure 12. Erreur d'estimation de débit par un capteur Doppler à l'aval d'un coude, pour deux distances à l'aval du coude, deux vitesses et trois taux de remplissage

conviendrait de vérifier s'il est généralisable. Si c'est le cas, les mesures de contrôles en seraient simplifiées.

En résumé, l'erreur d'estimation de débit est plus faible avec les cordes qu'avec le débitmètre Doppler. Cela est lié au fait que la technologie des cordes permet une mesure moyenne sur une transversale, et intègre donc la dissymétrie du champ de vitesse engendrée par le coude.

Conclusions

L'objectif de cette étude était de quantifier les erreurs associées à l'échantillonnage des vitesses par les capteurs usuels à l'aval de deux types de singularités présentes classiquement dans les réseaux d'assainissement : une confluence et un coude. Les réponses de deux types de capteurs ont été modélisées : un système à cordes et un système acoustique à effet Doppler. L'approche utilisée était basée sur une modélisation complète du processus de mesure : à partir des conditions d'écoulement au niveau du site de mesure pour une valeur de mesurande fixée. La réponse des capteurs a été étudiée en intégrant toutes les composantes du champ de vitesse dans la zone échantillonnée.

Les résultats ont montré que, pour la conduite à l'aval de la confluence, l'erreur d'estimation des débits devient négligeable dès que le capteur est positionné à une distance à l'aval de la jonction égale à 5 largeurs (x/B = 5) pour des mesures avec deux cordes et d'environ 10 largeurs pour un débitmètre à effet Doppler. Pour ce qui est du coude, les résultats ont montré que l'utilisation des cordes permet d'atteindre une erreur inférieure à 13 % dès une distance de 5 largeurs à l'aval du coude et ce, avec seulement une corde située près du radier. Avec un capteur Doppler, l'erreur peut atteindre 30 % à 5 largeurs à l'aval du coude et il faut une distance de 20 largeurs afin de réduire cette erreur à moins de 10 %.

Ces erreurs sont difficilement corrigibles, car elles varient en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau. Mais elles correspondent à ce qu'on peut attendre pour des mesures en réseaux d'assainissement. Ainsi l'agence de l'eau Rhin-Meuse [AERM, 2016] indique clairement que : « À titre d'exemple, pour des cas courants justifiant d'une bonne mise en œuvre et exploitation, des incertitudes de l'ordre de 20 à 30 % sont une valeur très satisfaisante. »

Les simulations réalisées dans le cadre de notre étude sont représentatives de conditions rencontrées dans des situations réelles. Elles ne prétendent pas couvrir tous les cas possibles. Il est donc utile de vérifier dans chaque cas particulier de singularité que l'on ne s'écarte pas trop de ces conditions génériques, en réalisant des mesures ponctuelles de vitesse ou de débit, par exemple par la méthode de dilution [LEPOT *et al.*, 2011] et en les comparant aux estimations effectuées par les capteurs. Cependant, les mesures sur le terrain ne sont pas exemptes d'incertitudes, et ne peuvent couvrir toutes les conditions d'écoulement. Elles doivent néanmoins permettre de détecter les anomalies les plus importantes et d'y remédier en général en déplaçant le(s) capteur(s) de vitesse.

Remerciements

Le projet Mentor (acronyme de *MEasurement sites conception method for sewer NeTwORks*, pour : Méthodologie et outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement) a bénéficié du soutien financier de l'Agence nationale de la recherche, « Notification de décision d'aide n° ANR 11 ECOT 007 01 du 13 décembre 2011 ».

Bibliographie

AFNOR (2001) : Norme NF P15-900-2. *Services publics locaux – Lignes directrices pour les activités de service dans l'alimentation en eau potable et dans l'assainissement – Partie 2 : gestion d'un réseau d'assainissement*, 46 pages.

AFNOR (2005) : Norme NF EN ISO 6416. *Hydrométrie – Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique)*, 62 pages.

AFNOR (2008) : Norme NF EN 752. *Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments*, 106 pages.

AERM – Agence de l'eau Rhin-Meuse (2016) : Guide pratique. Mise en place de l'autosurveillance des réseaux d'assainissement, document à l'attention des acteurs de l'assainissement, 164 pages [French],

consultable sur : http://cdi.eau-rhin-meuse.fr/Record.htm?idlist=4&record=19319019124911372919

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G. (2000) : *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Paris : Tech. et Doc. Lavoisier.

BEST J.L., REID I. (1984) : « Separation zone at open-channel junctions ». *Journal of Hydraulic Engineering ;* 110(11) : 1588-94.

BONAKDARI H., LARRARTE F., JOANNIS C. (2008) : « Study of the shear stress in narrow channels: application to sewers ». *Urban Water Journal ;* 5(1) : 15-20.

GURRAM S.K., KARKI K.S., HAGER W.H. (1997) : « Subcritical junction flows ». *Journal of Hydraulic Engineering ;* 123(5) : 447-55.

HACH (2008) : *Sigma 950 Flow meter: instrument manual*, HACH Company.

HIRT C.W., NICHOLS B.D., (1981) : « Volume of Fluid (VOF) Method for the dynamics of free boundaries ». *Journal of Computational Physics ;* 39 : 201-25.

ISO (2010) : ISO 15769:2010, *Hydrométrie – Lignes directrices pour l'application des compteurs acoustiques de vitesse utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos.*

KNIGHT D., STERLING M. (2000) : « Boundary shear in circular pipes running partially full ». *Journal of Hydraulic Engineering ;* 126(4) : 263-75.

LARRARTE F., JAUMOUILLIE P., JOANNIS C. (2004) : « Computational fluid dynamics: an aid for designing the instrumentation of sewer sections (La modélisation numérique des écoulements : un outil d'aide à l'instrumentation des collecteurs d'assainissement) ». *Novatech*, tome I : 729-36.

LARRARTE F., BONAKDARI H., JOANNIS C., LEVACHER D. (2007) : « Effets d'une déviation sur les champs de vitesses en réseaux d'assainissement ». *Techniques Sciences Méthodes, génie urbain génie rural ;* 11 : 43-50.

LARRARTE F., BARDIAUX J.-B., BATTAGLIA P., JOANNIS C. (2008) : « Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters ». *Flow Measurement and Instrumentation ;* 19 : 261-7.

LARRARTE F., BONAKDARI H., JOANNIS C. (2010) : « Qualification et conception de sites de mesures débitmétriques en réseaux d'assainissement ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées ;* 277 : 31-41.

LARRARTE F., VAREILLES S., DUFRESNE M., RIVIÈRE N., PONS M.N., LIPEME KOUYI G., *et al.* (2015) : « Mentor ou une méthodologie et des outils opérationnels de conception et de qualification de sites de mesures en réseau d'assainissement ». *Techniques Sciences Méthodes ;* 5 : 49-65.

LEPOT M., LIPEMEKOUYI G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., (2011), « Vérification des mesures de débit en réseau d'assainissement par traçage à la Rhodamine », *WT*, La Houille Blanche, n° 4, 2011, p. 43-48.

MIGNOT E., BONAKDARI H., KNOTHE P., LIPEME KOUYI G., BESSETTE A., RIVIÈRE N., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., (2012) : « Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and of their influence on location of flowmeters ». *Water Science & Technology ;* 66-6 : 1325-32.

MIGNOT E., VINKOVIC I., DOPPLER D., RIVIÈRE N. (2014) : « Mixing layer in open-channel junction flows ». *Envir. Fluid Mech ;* 14 : 1027-41, DOI 10.1007/s10652-013-9310-7.

MOMPLOT A., LIPEME KOUYI G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., MIGNOT E., RIVIÈRE N. (2013) : « Modélisation tridimensionnelle des écoulements multiphasiques en régime instationnaire au droit d'ouvrages spéciaux présents en réseau d'assainissement : performances des modèles et analyse de sensibilité ». *La houille blanche ;* 4 : 16-24.

NEOTEK (2008) : *ISCO 4250 User guide.*

NIVUS (1999) : *Instructions pour le montage de capteurs de vitesse d'écoulement.*

SHAKIBAINIA A., TABATABAI M.R.M., ZARRATI A.R. (2010) : « Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences ». *Can J Civil Eng ;* 37 : 772–81.

SPEZIALE C.G., SARKAR S., GATSKI. T.B. (1991) : « Modeling the pressure-strain correlation of turbulence : an invariant dynamical systems approach ». *Journal of Fluid Mechanics ;* 227 : 245-72.

STOVIN V.R., GRIMM J.P., BUXTON A.P., TAIT S.J. (2002) : « Parametric studies on CFD models of sewerage structures ». *9th Int. Conf. on Urban Drainage*. Portland, OR, États-Unis.

WEBER L., SCHUMATE E., MAWER N. (2001) : « Experiments on flow at a 90 open-channel junction ». *J Hydraul Eng ;* 127(5) : 340-50.

A. EL BAHLOULI, E. MIGNOT, F. DENIS, N. RIVIÈRE, A. DALMON, G. LIPEME KOUYI, C. JOANNIS, F. LARRARTE

Fiabilité de la mesure de vitesse débitante à l'aval d'une singularité en réseau d'assainissement

Les gestionnaires de réseau d'assainissement urbain sont amenés à équiper leurs réseaux de points de mesures débitmétriques. Lorsqu'une relation permanente permettant de relier localement la hauteur d'eau et le débit n'existe pas, il est nécessaire de mesurer la vitesse moyenne de l'écoulement afin d'en déduire le débit localement. L'objectif de cet article est de quantifier les erreurs faites lorsqu'une mesure de vitesse est effectuée à l'aval d'une singularité pour des situations réalistes de collecteurs d'assainissement urbain. La première section de cet article présente les deux types de capteurs (cordes et Doppler) en détaillant leur mode d'échantillonnage spatial ainsi que les sources d'erreur associées. La deuxième section présente la démarche de modélisation numérique ainsi que les domaines de calcul associés à l'aval respectivement d'une confluence et d'un coude. Enfin, la troisième partie présente les résultats en matière de réponse des capteurs à ces champs de vitesse et discute les erreurs pour les différentes configurations considérées.

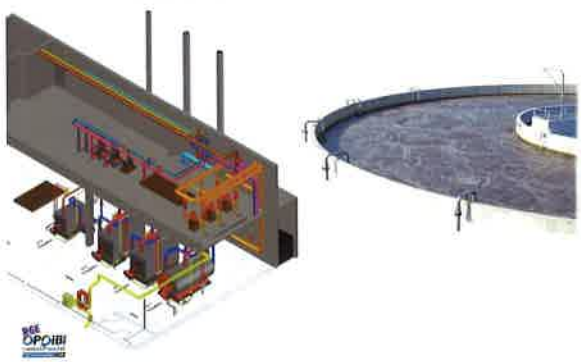
Abstract

A. EL BAHLOULI, E. MIGNOT, F. DENIS, N. RIVIÈRE, A. DALMON, G. LIPEME KOUYI, C. JOANNIS, F. LARRARTE

Assessment of velocity measurements downstream of a singularity in sewer network

When managing a sewer network, the water discharge has to be measured in real time at several locations in the network. In locations where a simple stage discharge relationship cannot be applied due to an influence of the backwater curve, this measurement is to be performed using sensors that measure the bulk velocity locally in order to estimate the discharge. The aim of this work is to quantify the errors made when such measurement is performed downstream from two types of singularities: a bend and a confluence, which are commonly encountered in sewer networks. Two types of sensors are tested: a time-of-flight flow meters and a acoustic Doppler flowmeter. Both technologies are first detailed along with their possible sources of errors when used in the vicinity of singularities. The second section then introduces the numerical calculation of all flow configurations tested downstream both kinds of singularities. The third section shows the results in terms of error of discharge estimation as a function of the location with regards to the singularities, the type of singularity and the flow conditions. This permits to finally make recommendations for the use of such sensors in a real sewer network.

LARBRE INGÉNIERIE
ÉNERGIE - ENVIRONNEMENT



Etudes Techniques du Bâtiment

- Chauffage - Ventilation - Conditionnement d'air
- Diagnostics thermiques - STD
- Équipement sanitaire - Fluides médicaux
- Électricité - Courants forts et faibles
- Coordination SSI
- Cuisines collectives

Infrastructures

- Voiries & Réseaux Divers
- Eau potable
- Assainissement
- Hydraulique urbaine
- Milieu Naturel

Présents en Régions
Grand Est, Nouvelle Aquitaine, Centre & Auvergne
Rhône Alpes

www.larbre-ingenierie.fr

Maîtrise de la Désinfection de l'Eau

Lutz The Fluid Managers — Jesco

Chloration **C2213/C2214**

Pompe Doseuse **MAGDOS** et **MEMDOS SMART**

Electrochloration **EASYCHLORGEN**

Mesure & Régulation **EASYPRO**
(Cl_2, Redox, pH, conductivité)

www.lutz-jesco.com
www.lutz-france.fr

Doser | *Les liquides*
Transporter | *Les gaz*
Régler | *Les systèmes*